

CPM・Nd:YAG レーザーの FCM 強調発振 (2)

田尻 昇* 宇井 克行** 北嶋 巖**

Enhanced FCM of a Nd:YAG Laser in CPM Operation (2)

Noboru TAJIRI, Katsuyuki UI and Iwao KITAZIMA

(Received Aug. 31, 1999)

The pulsewidth of flash-lamp pumped Nd:YAG laser in a linear cavity is significantly shortened by joint operation of CPM (Colliding Pulse Mode-locking) and FCM (Feedback controlled Mode-Locking). Power limiting by the intracavity self-defocusing due to two-photon absorption in GaAs with a pinhole in both sides is exploited to create the optimum condition for the pulse compression in a saturable absorber. We tried to determine the optimum condition of the pinholes namely the dependence of pulse train duration on the position and the diameter of the pinholes. Under the optimum condition, the pulse train was stretched up to 1540ns, and the pulsewidth was shortened down to 2.8ps in sech^2 shape, while the pulse energy was still $10 \mu\text{J}$.

Key Words : YAG Laser, CPM, FCM, Self-defocusing, Power Limiter, 2.8ps

1 はじめに

モード同期とは、縦多モード発振におけるモード間周波数を一定に固定し、ある時刻で位相を揃えることにより、超短パルス列を発生させる方法である。1965年にルビーレーザーの受動モード同期が初めて実現された[1]。モード同期レーザーは高いピークパワーの短パルスが得られることから物性研究、光パラメトリック発振などに応用されている。

モード同期には主に、光変調器を共振器内に挿入して外部から制御する強制モード同期と非線形光学媒体を挿入して外部制御を行わない受動モード同期に大別される。これらの特徴として、前者は外部信号と同期が可能で高安定性であること、また後者は短パルス性で低コストに優れていることなどが挙げられる。

*大学院工学研究科電子工学専攻

**電子工学科

ここで入射強度が増加すると光吸収に飽和が生じ光透過度が大きくなる可飽和吸収体を用いた受動モード同期発振は H.W.Mocker ら[1]が初めて行い、これを改良して 1981 年に色素レーザーのリング型共振器による衝突パルスモード同期 (CPM) 法が R.L.Fork[2]らにより考案された。

強制モード同期と受動モード同期の長所を有するハイブリッドモード同期も実現されている[3]。

我々の研究室では、可飽和吸収色素セルを Nd:YAG レーザー共振器内に挿入した CPM 発振を試みた[4]。さらに、可飽和吸収色素セルを 2 つ用いることでパルス幅短縮効果を高める 2 重 CPM により最短 4ps のパルス幅を得ている[5]。また、前回の報告では 3ps を得ている[6]。

今回は、CPM-Nd:YAG レーザーにフィードバックコントロールモード同期 (FCM) を併用して、ピンホールを最適化することで、パルス幅短縮効果を高めることを検討したので報告する。

2 実験原理

2-1 CPM 発振の原理

CPM (Colliding pulse mode-locking) とは、共振器内に 2 本以上にパルスを作り可飽和吸収体の中で衝突させて、強度選択効果により縦モード間隔を固定する方法である。

可飽和吸収体を出力鏡、または反射鏡に密着させる従来の方法では、共振器内に立つパルス本数は 1 本でありモード間隔は $2L/c$ (c :光速) になるが、 L/m (L :共振器長 m :正数) に挿入すると、パルス本数は m 本でありモード間隔は $2L/mc$ になり、挿入位置によりパルス本数を自由に決めることができる。

我々の研究室でガラスレーザーの共振器において可飽和吸収体を $L/2$ に挿入することで、パルス本数を従来の 2 倍にして近赤外色素レーザーの励起光源として用いている [7]。また、 $L/4$ に挿入するとパルス衝突が 2 ヶ所で行われるため、可飽和吸収体を 2 つ用いる 2 重 CPM 発振が行ってパルス幅を格段に短縮している [8]。CPM のパルス幅短縮には、(1)パルス前端部の吸収、(2)パルスの衝突重ね合わせによる裾吸収の増大、(3)可飽和吸収体が異常分散媒質となることによるチャープ補償、(4)過渡的回折格子によるパルス後端部の散乱などが考えられている [9]。

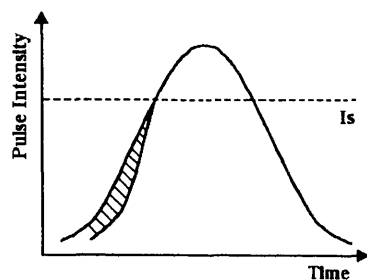


Fig. 1 Absorption of front of pulse.

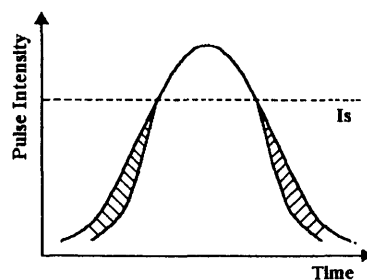


Fig. 2 Increase in absorption of edge of pulse by superposition.

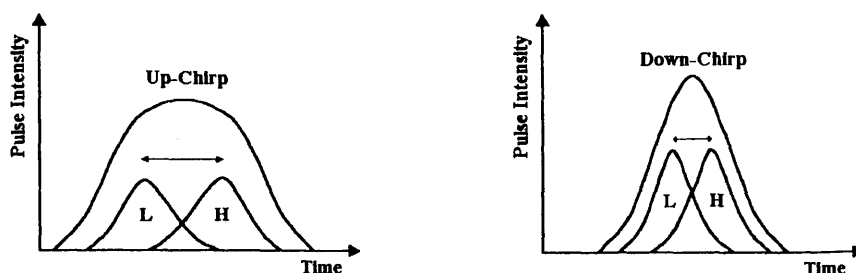


Fig. 3 Compensation of up-chirping based on saturable absorber is anomalous dispersion media.



Fig. 4 Formation of transient grating in the absorber cell by superposing the counter running pulse.
Scattering the trailing edge of each pulses by transient grating.

2-2 FCM 発振の原理

CPM のパルス幅短縮効果を高めると共に安定させる方法として、共振器内のパルス周回数を増加させることが考えられる。そこで、パルス列を拡張させるために FCM の併用が有効になる。

FCM とは NFE (Negative Feedback Element) を共振器内に挿入し、NFE の 2 光子吸収による自己発散効果とピンホールにより透過光のエネルギーを制御することで、利得の急激な立ち上がりを抑制してパルス列を拡張する方法である。以下に、NFE の自己発散効果について述べる [10]。

NFE が二光子吸収を含む場合、 dz 当たりの入射光 $I(0, t)$ の減衰を表す式は、線形吸収係数を α 、非線形吸収を β とすれば

$$\frac{dI}{dz} = -\alpha I - \beta I^2 \quad (1)$$

となり、式(1)より NFE 内を通過する光強度 $I(z, t)$ は α が無視できる程小さいとすると

$$I(z, t) = \frac{I(0, t)}{1 + \beta z I(0, t)} \quad (2)$$

となる。NFE 内に生じる全自由キャリア数 $N(r, t)$ は式(2)を時間積分して式(3)で与えられる。

$$N(r, t) = \int_0^t \left(\frac{\alpha I(r, t)}{h\nu} + \frac{\beta I^2(r, t)}{2h\nu} \right) dt \quad (3)$$

ここで、 h はプランク定数、 ν はレーザーの発振周波数である。

光の吸収による屈折率の変化は式(4)になる。

$$\delta n(r, t) = - \frac{C n(r, t) e^2}{2 n_0 m^* \epsilon_0 \omega^2} \quad (4)$$

C は定数、 n_0 は屈折率、 e は電子の電荷、 m^* は電子の有効質量である。この屈折率の変化によって、2 光子吸収があると光強度により位相差が生じ、凹レンズ状態になり透過光が広げられる自己発散効果が Fig.5(a) のように起こる。この自己発散効果とピンホールにより、透過エネルギーを制御して急激な利得の立ち上がりを抑制することで、パルス列を Fig.5(b) のように拡張することができる。

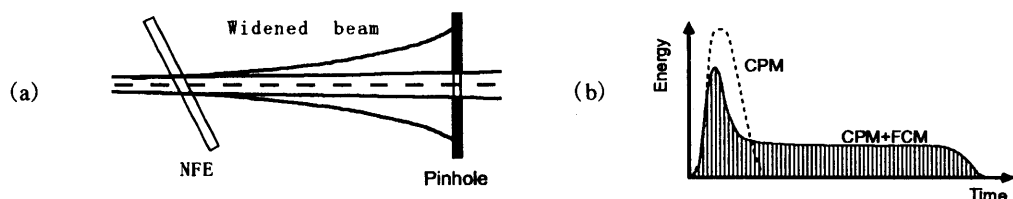


Fig.5 (a) Energy limiter based on self-defocusing in NFE.
(b) Envelope of pulse train.

3 実験と結果

3-1 CPM 発振

Fig.6 に CPM 発振の実験系を示す。共振器長 1.2mm のファブリペロー共振器を用いた。出力鏡、反射鏡には反射率がそれぞれ 80%, 100% のくさび型にカットしたものを使用した。Nd:YAG ロッドは、長さ 90mm, 直径 7mm のものを使用して、共振器の中央に配置した。このロッドの両端は、ブリュースター角 (61.2°) にカットされ、反射による損失を軽減している。励起光源には 2 本の Xe

フラッシュランプを使用した。YAG ロッド及び Xe フラッシュランプはハウスに収納した。熱による YAG ロッドでの発振効率の低下や、Xe フラッシュランプの疲労を防ぐためにハウス内に冷却装置で冷却したイオン交換水をポンプにより循環させた。可飽和吸収体には緩和時間の短い NDL-112 (日本感光色素) を用いて、色素濃度を $7.0 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$ とした。また、溶液には 1-2 ジクロロエタンを用いた。色素セルの中心部の劣化を防ぐ事と、濃度の安定化を目的として、一定時間毎に循環装置で連続攪拌した。0.5mm 厚の色素セルを反射鏡から光学的に共振器長の 1/4 のところにブリュースター角 (74.0°) で挿入した。また、横モードを抑えるために色素セルと反射鏡の間に直径 2.5mm のピンホールを挿入した。パルス幅測定には、比較的容易に行える TPF (2 光子蛍光) 法を用いた。TPF の蛍光体として、Rh-6G エタノール溶液を使用した。このとき得られた蛍光パターンをフォトデンスitomーターでトレースした。また、出力の一部をバイブラナー光電管に導き 350MHz のオシロスコープ (岩崎通信機 SS-7635) でモード同期のかかり具合とパルス列幅を観測した。

対向する 2 つのパルスが色素セル内で正確に衝突することを確認するため、反射鏡側と出力鏡側にそれぞれ 1mm 間隔で移動させ、最適色素セル位置を求めた。その結果を Fig.7 に示す。

色素セルが 0 の位置で平均パルス幅が最も短くなり、その位置からずれるにしたがつて長くなることから、対向する 2 つのパルスが色素セル内で正確に衝突していることがわかる。また、最短パルス幅は sech^2 と仮定すると 6.9ps となり、パルスエネルギーは $40 \mu\text{J}$ となった。

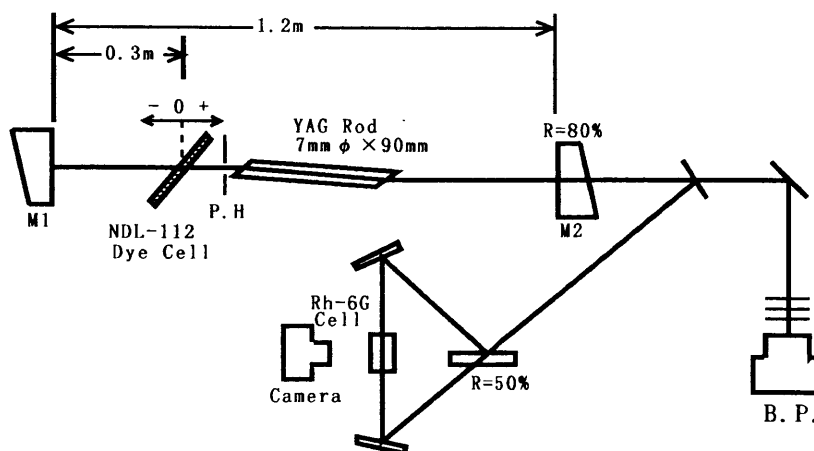


Fig. 6 Experimental setup of CPM-YAG laser.

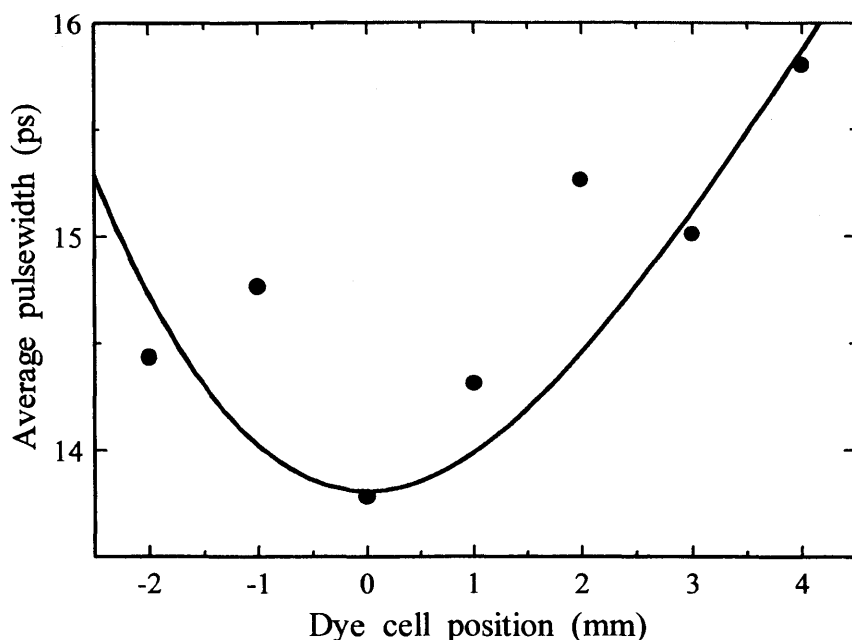


Fig. 7 The average pulsewidth (sech²) versus the position of absorber cell .

3-2 CPM-FCM 発振

3-2-1 NFE によるパルス列の拡張

Fig.8 に CPM-FCM 発振の実験系を示す。出力鏡側 L/4 の位置に NFE として GaAs (undoped, [100] : 0.45mm × 50mm Φ) をブリュースター角 (56.4°) に挿入した。2.5mm Φ のピンホールをロッドと GaAs 間の適当な位置に挿入して CPM-FCM 発振を行った。この時、対向するパルスが GaAs 内で正確に衝突することで NFE の二光子吸収による自己発散効果が強められることを確認するため、可飽和吸収色素の濃度 $7 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$ を用いて、GaAs を反射鏡側と出力鏡側にそれぞれ 1mm 間隔で移動させたときのパルス列幅、パルス幅を測定した。その結果を Fig.9 に示す。

Fig.9 より共振器長の 1/4 である 0mm の位置において、パルス列幅は最も長く 610ns となり、パルス幅は平均 5.4ps (sech²) であった。そして、0mm の位置からずれるに従ってパルス列幅は短くなり、パルス幅が長くなった。

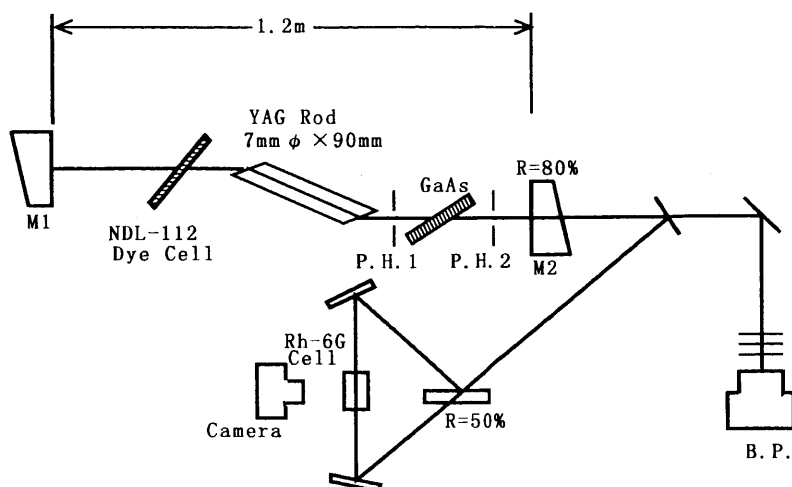


Fig. 8 Experimental setup of CPM-FCM Nd:YAG laser.

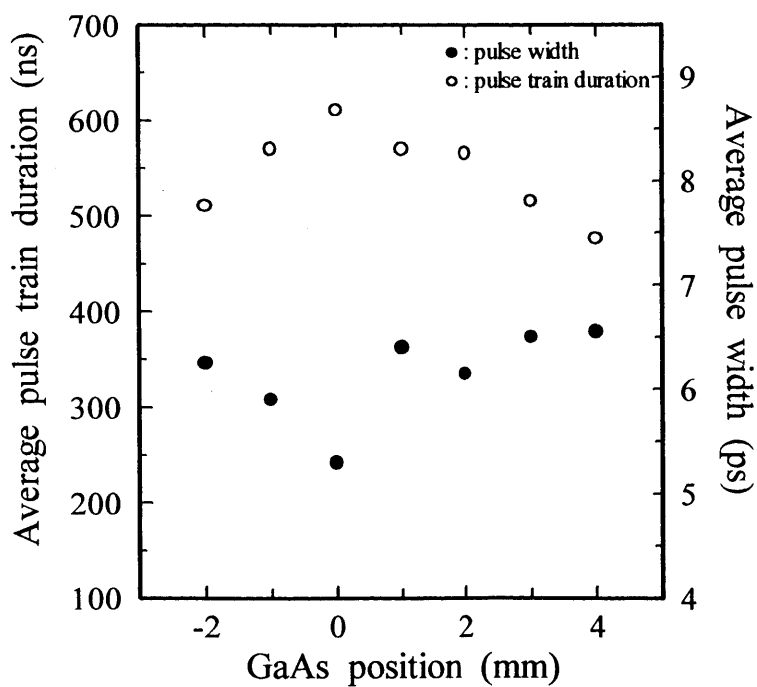


Fig. 9 Dependence of the average pulsewidth and pulse train duration on the position of GaAs.

3-2-2 可飽和吸収色素濃度におけるパルス列とパルス幅の依存性

次に、ピンホール (P.H1) を GaAs より 90mm の位置に置き、またピンホール (P.H.2) を GaAs より 150mm に挿入して、可飽和吸収色素濃度を変えたときのパルス列幅とパルス幅の依存性を調べた。その結果を Fig.10 に示す。

各色素濃度において、パルス列幅は 400ns 台と 800ns 台に別れた。そして、パルス列幅が長くなるにつれてパルス幅が短くなっている。色素濃度が高くなるとパルス列幅とパルス幅のばらつきが少なくなり安定した。色素濃度 9×10^{-5} mol/l では、パルス列幅 450ns での平均パルス幅は 4.1ps であり、850ns では 3.6ps となった。また、平均パルス幅の変化は小さくなり、最短パルス幅は 2.8ps であった。

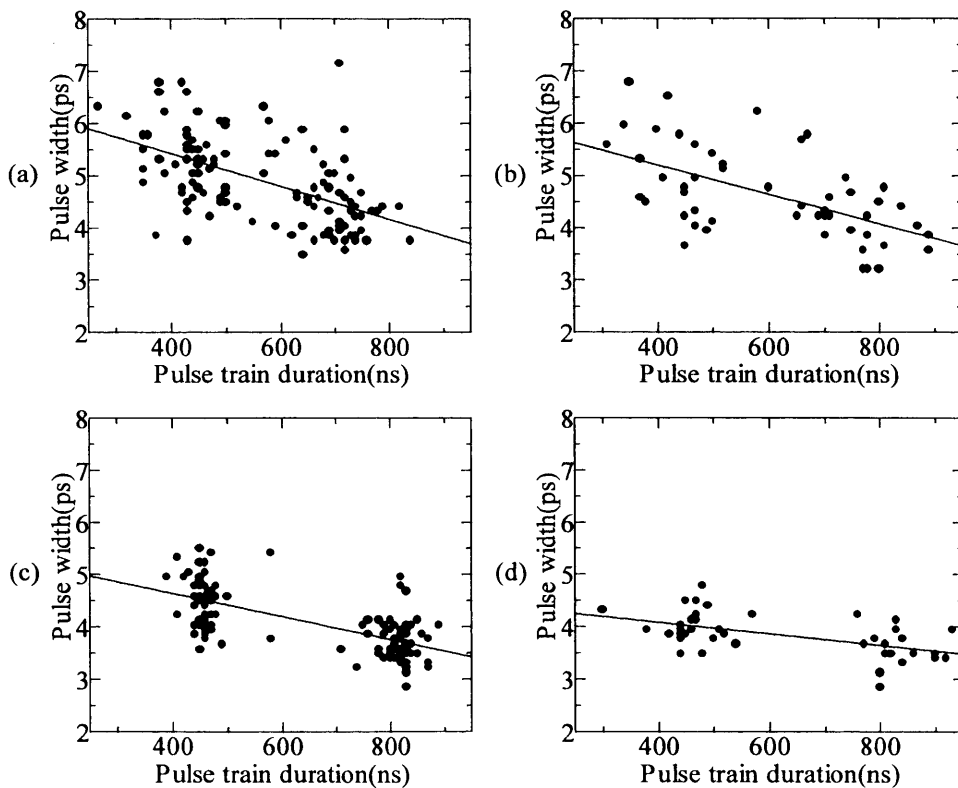


Fig.10 Dependence of the pulse width (sech²) on pulse train duration:

(a), (b), (c), (d) is concentration of saturable absorber, 6×10^{-5} mol/l,

7×10^{-5} mol/l, 8×10^{-5} mol/l, 9×10^{-5} mol/l, respectively.

The position of pinhole.1 and pinhole.2 is 90mm, 150mm from GaAs, respectively.

3-3-3 ピンホールの位置におけるパルス列の拡張

Fig.11 に GaAs とロッドの間に P.H.1(直径 2.5、2.0mm)1 枚を挿入した場合の平均パルス列幅を示す。横軸は GaAs から P.H.1 までの距離である。Fig.11 から P.H.1 (2.5mm) を GaAs から 109mm の位置に挿入したときに、平均パルス列幅は 1010ns と最も長くなり、最長パルス列幅は 1230ns となった。P.H.1 (2.0mm) を GaAs から 101mm としたとき、平均パルス列幅は 1070ns と最も長くなり、最長パルス列幅は 1540ns となった。2.0mm Φ のピンホールの方がパルス列拡張には有効であることがわかる。また、P.H.2 のみで同様の実験を行ったところ結果も同様になった。ところが、P.H.1、P.H.2 を 2 枚挿入した場合は、パルス列幅は 800ns 程度と短くなった。

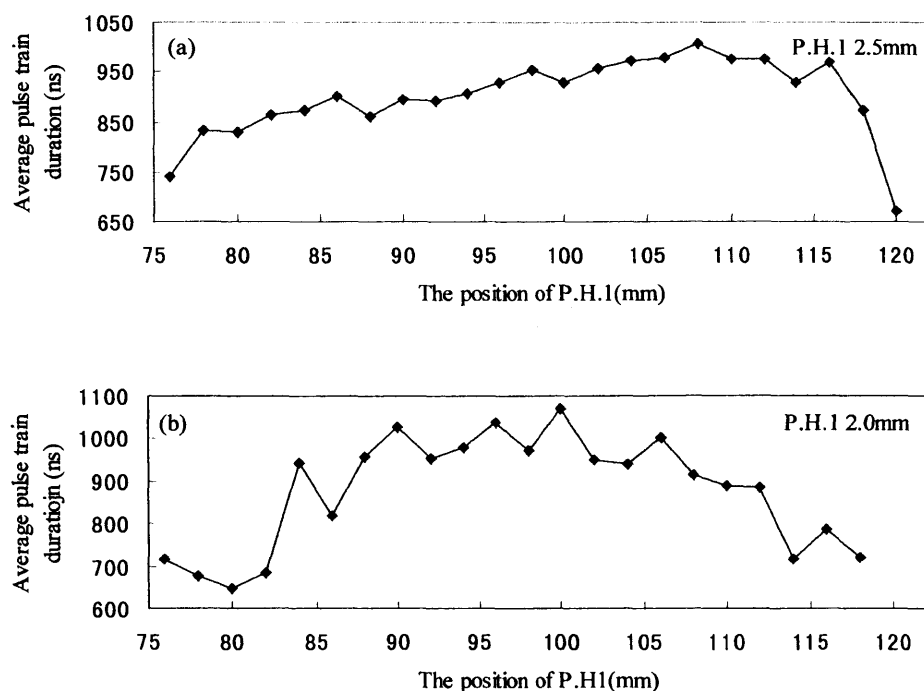


Fig. 11 The average pulse train duration on the position of pinhole.1.

(a) The diameter is 2.5 mm.

(b) The diameter is 2.0 mm.

4 考察と結論

CPM のみではパルス列幅は 80ns であった。それ故共振器内の 1 パルスの周回時間は 8ns であることから周回数は 10 回程度であり、パルスの色素セル通過回数が少ないので、可飽和吸収色素による 4 つのパルス幅短縮効果は低く、最短パルス幅は 5.4ps であった。しかし、FCM を併用することでパルス幅は、CPM の 1/2 に相当する 2.8ps まで短縮することができた。これは、パルス列幅が 1000ns 以上、パルス周回数は 125 回以上に増加したために、パルス幅短縮効果が有効に働いたため考えられる。

色素セルを L/4 に挿入したのでパルスは 4 本立ち、パルスが衝突し重なり合う場所が反射鏡側 L/4 (色素セル) と出力鏡側 L/4 の 2 ヶ所に生じる。そのために、パルス強度が高くなる出力鏡側 L/4 に GaAs を正確に設置することで FCM の効果を高めることができた。

色素濃度については、高くなるにつれてパルス列が拡張され、パルス幅は短くなり、ばらつきも $\pm 0.7\text{ps}$ と小さくなった。これは、GaAs が 2 光子吸収によりエネルギー制御を開始する強度が約 $200\text{MW}/\text{cm}^2$ であり、色素濃度を高くすると色素が飽和し、モード同期が始まる強度 (モード同期のしきい値 $50\text{MW}/\text{cm}^2$) が高くなる。つまり、モード同期が開始してすぐに (パルス周回数 10 回程度) GaAs の 2 光子吸収が始まるので、パルス列の立ち上がり部分から有効にエネルギー制御が行われるためと考えられる。また、各色素濃度においてパルス列幅が、400ns 台と 800ns 台に大きく別れた原因として、FCM はパルス強度自身による完全な受動フィードバックであるので、上述のパルス列の立ち上がり部分のパルス強度がパルス列の拡張に大きく影響される。そのため、この改善方法として光変調器により強度変調することで、GaAs への入射パルス強度を安定させることが考えられる。

Fig.12 に P.H.1、P.H.2 を GaAs の両側に 2 枚挿入したときの数値計算を示す。このシミュレーションから P.H.1 と P.H.2 共に GaAs から、できるだけ遠くに設置すればエネルギーのカットが多くなり、パルス列が拡張されることを表している。しかし、実験結果の P.H.1 の最適位置は 109mm になった。今後は、熱レンズ効果を含めた緻密なシミュレーションを行い、ピンホールと自己発散効果の依存性の更なる解明が必要である。

P.H.1、P.H.2 をそれぞれ 1 枚のみを最適位置に設置することでパルス列は、最大 1570ns まで拡張することができた。しかし、2 枚同時に設置すると 800ns 程度と短くなってしまった。最適位置を 1 枚ずつ単体で決定したためであり、2 枚目の最適位置は 1 枚目を設置したままで決定すれば、さらにパルス列を拡張できると考えられる。また、パルス列が 1000ns を越えるとパルスエネルギーは $5\text{ }\mu\text{J}$ と小さくなり、パルス幅は測定できなかった。

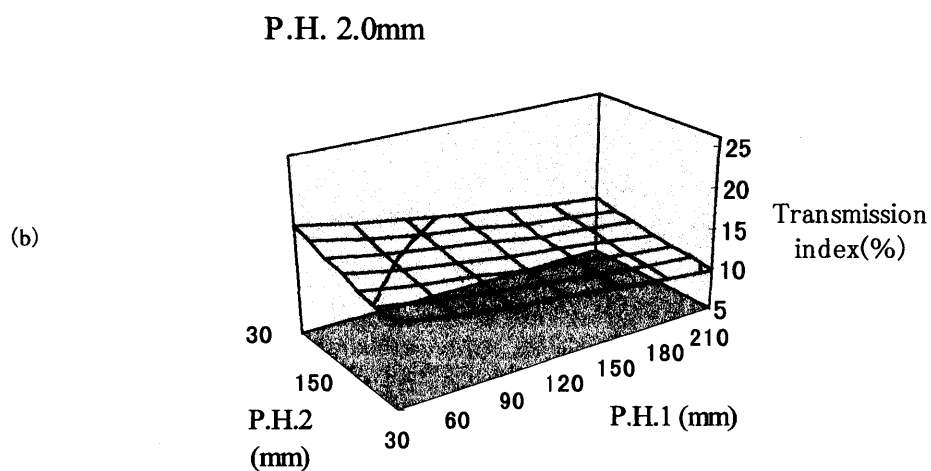
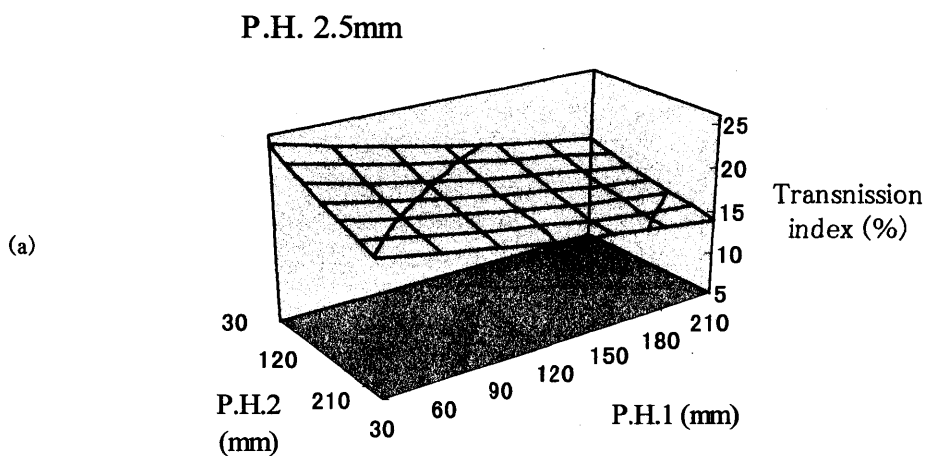


Fig.12 Calculated data on energy limiter.

Transmission index is plotted versus P.H.1 and P.H.2.

P.H.1 and P.H.2 is distance from GaAs.

(a), (b) The diameter of pinhole is 2.5mm, 2.0mm, respectively.

5 まとめ

Table1 The pulse width and the pulse train duration with CPM-FCM Nd:YAG laser.

		CPM	CPM + FCM			
		1 Cell	2 Pinholes P.H.1=90 P.H.2=150(mm)		1 Pinhole	
					d=2.5(mm Φ)	d=2.0(mm Φ)
Pulthwidth	Shortest (ps)	6.9	2.8			
	Average (ps)	12.6	3.6			
Longest pulse train duration(ns)		80	920	1230	1540	
Number of pulses		40	460	615	770	
Energy of pulse (μ J)		40	10	5	5	

CPM・Nd:YAG に FCM を併用したところ最短パルス幅は 6.9ps となり、それに FCM を併用することでパルス列幅は 680ns となり、最短パルス幅は 5.4ps となった。最適な可飽和吸収色素濃度 (9×10^4 mol/l) で、それぞれ 850ns、2.8ps になった。2.0mm Φ の P. H. 1 を用いて最適位置 (GaAs からロッド側へ 109mm) に挿入することで、パルス列幅は 1540ns にまで拡張することができた。しかし、エネルギーが小さくなり TPF (2 光子蛍光) 法が困難になりパルス幅の測定ができなかった。

可飽和吸収色素セルを反射鏡側 L/4 の位置に設置することにより、光強度が高くなることにより出力鏡側 L/4 の位置に GaAs を挿入することが可能となる。それにより色素の飽和強度と GaAs の自己発散効果が起こる強度との差を小さくすることができる。つまり、モード同期が始まってから数ラウンドトリップ後には自己発散が始まるため、パルス列成長の初期の段階からエネルギー制御が効果的に行われる。

今後の課題として、パルス列幅、パルス幅をさらに安定させるためには、パルス列成長の初期段階でのパルス強度を安定させることが重要である。そのために、光変調器を共振器内に挿入し、強制モード同期の併用が考えられる。また、数 μ J におけるパルス幅測定を容易にするため TPF 法の改良が必要である。

参考文献

- [1] H.Mcker and R.Collins : *Appl.Phys.Lett.* 7 (1965) 270.
- [2] R.L.Fork, B.I.Greene and C.V.Shank : *Appl.Phys.Lett.* 38 (1981) 671.
- [3] A.Del.Corno, G.Gabetta, G.C.Real, V.Kubeczek and J.Marec : *Opt..Lett.* 15 (1990) 734.
- [4] 北嶋巖、工藤康二、加瀬谷浩康 : レーザー研究 24 (1996) 1091.
- [5] I.Kitazima, K.Kudouh : *Optics Comm.* 137 (1997) 290.
- [6] 加瀬谷浩康、寺前英徳 北嶋巖 : 福井大学工研報告 45 (1997) 167.

- [7] 北嶋、尾崎、瀧谷、岡井、岩澤：レーザー研究 19(1991)114.
- [8] 工藤、北嶋：福井大学工研報告 43(1995)165.
- [9] 北嶋、田中、吉田、工藤、藤木、岡井：電子情報通信学会技研報告 OQE92-12(1992)33.
- [10] A.Agnesi, A.Del.Corno, P.D.Trapari, M.Fogliani, G.C.Real, J.C.Diels, C.Y.Yen, X.M.Zhano, V.Kavecek：IEEE J. Quantum Electron. QE-28(1992)710.

